



На правах рукописи

УДК 538 97 621 375 826

РЫБАЛТОВСКИЙ АНДРЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ
ФОСФОРСИЛИКАТНЫХ СВЕТОВОДОВ
К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ**

Специальность 01 04 21–лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007 г

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

К началу данной работы (1999 г.) приобрели актуальность исследования волоконных световодов с сердцевиной нового химического состава кварцевое стекло, легированное оксидом фосфора (фосфоросиликатные световоды, ФСС). Это было вызвано, в первую очередь, возможностью создания на основе ФСС волоконных лазеров и усилителей, работающих на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света в сердцевине световода. Основным преимуществом ВКР-лазеров (усилителей)¹ является возможность получить генерацию (усиление) практически на любой длине волны. Поэтому ВКР-лазеры являются перспективными как для систем волоконно-оптической связи, так и для ряда других применений в науке и технике. Например, ВКР-лазеры, генерирующие излучение на длине волны $\sim 1,24$ мкм, могут служить источником накачки для волоконных усилителей в телекоммуникационном окне на $\sim 1,30$ мкм, а генерирующие излучение на длине волны $\sim 1,48$ мкм – для волоконных усилителей в окне на $\sim 1,55$ мкм.

В отличие от ФСС, стандартные световоды с сердцевиной из германосиликатного стекла не являлись подходящей нелинейной средой для ВКР-лазеров из-за малой величины стоксова сдвига основной полосы комбинационного рассеяния (КР), всего ~ 440 см⁻¹. В то же время в спектре КР фосфоросиликатного стекла присутствует интенсивная полоса, обусловленная колебаниями двойной Р=О связи, с гораздо большим стоксовым сдвигом, 1320 см⁻¹. Поэтому при накачке в диапазоне $1,0$ – $1,1$ мкм в ВКР-лазерах на ФСС излучение с длиной волны $1,24$ мкм может быть получено в однокаскадном конвертере, а излучение на $1,48$ мкм – в двухкаскадном. Для сравнения, при использовании германосиликатного световода потребовалось бы трехкаскадное преобразование в первом случае и шестикаскадное (!) во втором. Таким

¹ В иностранной литературе ВКР и ВКР-лазеры (усилители) называют соответственно рамановское рассеяние и рамановские лазеры (усилители).

образом, использование ФСС позволяло существенно упростить конструкцию ВКР-лазеров и повысить их эффективность

Следует также отметить, что ФСС являются наиболее подходящими и для целого ряда волоконных лазеров и усилителей, принцип действия которых основан на эффекте вынужденного излучения редкоземельных элементов (РЗЭ) Спектральные характеристики и эффективность работы большинства РЗЭ-лазеров в значительной степени определяются матрицей стекла сердцевинного световода Для большинства РЗЭ матрица фосфоросиликатного стекла имеет значительное преимущество перед матрицами как германосиликатного, так и нелегированного кварцевого стекла Например, в случае Yb-Er лазера эффективная передача энергии накачки от ионов Yb^{3+} к ионам Er^{3+} возможна только в матрице фосфатных стекол (в частности, фосфоросиликатного стекла)

Для эффективного ВКР-преобразования требуются ФСС с высоким содержанием оксида фосфора в сердцевине и при этом с малыми оптическими потерями Эта технологическая задача к началу данной работы была решена в ИЦВО при ИОФРАН совместно с ИХВВ РАН были разработаны и изготовлены высоколегированные (концентрация $\text{P}_2\text{O}_5 \sim 12\text{--}15$ мол %) световоды с сердцевинной из фосфоросиликатного стекла и с рекордно низкими оптическими потерями (менее 2 дБ/км в диапазоне длин волн 1000–1600 нм) Однако в лабораторных образцах ВКР-лазеров, созданных на базе таких световодов, в качестве зеркал-отражателей резонаторов использовались брэгговские решетки показателя преломления, записанные в германосиликатных световодах при помощи излучения с длиной волны 244 нм, полученного путем преобразования во вторую гармонику излучения Ar^+ лазера на длине волны 488 нм Такие решетки приходилось приваривать к ФСС, что усложняло конструкцию лазеров Кроме того, при сварке отрезков германосиликатных световодов с ФСС в резонаторе ВКР-лазера возникали дополнительные оптические потери, которые приводили к снижению эффективности лазеров Необходимость использования решеток, записанных в германосиликатных световодах объяснялась тем, что ФСС оказались нечувствительными к излучению с длиной волны 244 нм, и поэтому решетки в них записывать не удавалось Таким образом, была

поставлена задача создания лабораторной технологии записи высококонтрастных брэгговских решеток в ФСС. Для этого необходимо было выявить и исследовать фотоиндуцируемые изменения в сетке стекла ФСС (наведенное оптическое поглощение и наведенный показатель преломления (ПП)), сравнить лазерное воздействие на различных длинах волн, исследовать специфику фотоиндуцированных воздействий в присутствии молекулярного водорода в стекле, который ранее использовался для повышения фоточувствительности германосиликатных световодов, определить оптимальные режимы наведения ПП (длину волны и параметры лазерного излучения). Эти задачи и решались в данной работе. Исследования данной работы напрямую применимы также к ФСС, солегирированным РЗЭ, и в конечном счете открывают возможность записи внутриволоконных зеркал-отражателей (брэгговских решеток) в таких световодах с целью создания высокоэффективных РЗЭ-лазеров.

Цели работы

Таким образом, цели данной работы были следующие:

- исследование воздействия лазерного излучения УФ-диапазона (248, 193 и 157 нм) на ПП и оптические потери в ФСС,
- исследование микроскопического механизма эффекта фотоиндуцированного наведения ПП в ФСС,
- определение роли молекулярного водорода, растворенного в сетке стекла, в эффекте фотоиндуцированного наведения ПП в ФСС,
- создание методики записи брэгговских решеток ПП в ФСС с низкими оптическими потерями, которые могли бы использоваться в волоконных лазерах в качестве зеркал-отражателей.

Научная новизна

Впервые экспериментально продемонстрирована фоточувствительность ФСС на длине волны генерации F_2 -лазера – 157 нм

Впервые в ФСС измерено стабильное при комнатной температуре фотоиндуцированное увеличение ПП (без предварительного насыщения световодов водородом) при облучении на длине волны генерации ArF-лазера – 193 нм

В спектре наведенного поглощения образцов фосфоросиликатной заготовки, предварительно насыщенных водородом и облученных затем на длине волны 193 нм (ArF-лазер), обнаружена интенсивная полоса с максимумом 6,9 эВ (180 нм). Установлена связь данной полосы с поглощением фосфорного кислородо-дефицитного центра (ФКДЦ). Предложена модель ФКДЦ в виде трехкоординированного атома фосфора, связанного с двухкоординированным атомом кремния в кварцевом стекле. Показано, что наведенное поглощение ФКДЦ вносит значительный вклад в наведение ПП при облучении на длине волны 193 нм.

Впервые проведено сопоставление скорости наведения ПП в ФСС при использовании различных режимов и различных длин волн УФ-облучения (157, 193 и 248 нм). Показано, что режим облучения световодов F_2 -лазером (длина волны 157 нм) является самым эффективным с точки зрения наведения ПП. Предложено объяснение более высокой фоточувствительности на длине волны 157 нм по сравнению с режимами облучения ArF (193 нм) и KrF (248 нм) лазерами.

Практическая ценность

В работе получены результаты по исследованию наведения ПП в ФСС при использовании различных режимов УФ-облучения. Впервые предложен достаточно простой в реализации и информативный метод исследования фоточувствительности ФСС, заключающийся в анализе формы кривой дозы зависимости наведенного ПП и производной от нее. В частности, с помощью

этого метода установлен двухэтапный механизм преобразования точечных дефектов, ведущий к изменению ПП

Определены наиболее оптимальные режимы записи брэгговских решеток в ФСС при помощи эксимерного ArF-лазера Разработанная методика записи брэгговских решеток в ФСС была использована в НИЦВО РАН при создании волоконных ВКР-лазеров с рекордно высокой эффективностью Результаты работы также могут быть использованы при разработке и создании промышленных установок на базе эксимерных лазеров для серийного изготовления брэгговских решеток в фосфоросиликатных волоконных световодах. в частности, результаты работы планируется использовать для оптимизации параметров технологической установки, предназначенной для записи брэгговских решеток, создаваемой в Центре физического приборостроения при Институте Общей Физике им А М Прохорова РАН

Апробация работы

Материалы, изложенные в диссертации, доложены на Международных конференциях по брэгговским решеткам, фоточувствительности и полингу BGPP (Флорида, США, 1999 г и Стрза, Италия, 2001 г), Международной конференции по лазерам Lasers-2001 (Туксон, США, 2001 г), Европейской конференции по оптической связи ECOC (Мюнхен, Германия, 2000 г), Международной конференции по волоконно-оптической связи OFC (Атланта, США, 2003 г), 14-й Международной конференции по физике лазеров LPHYS (Братислава, Словакия, 2002 г), а также на научных семинарах и на конкурсах работ молодых ученых НИЦВО По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых журналах

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка и 2 таблицы Список литературы содержит 98 наименований

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, ее научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Кратко изложено основное содержание материала по главам.

В первой главе сделан обзор литературных данных по технологии получения и свойствам ФСС, явлению фоточувствительности световодов и применению этого эффекта для создания периодических структур в световодах (решеток ПП), влиянию молекулярного водорода на эффективность протекания фотохимических процессов. В параграфе 1.1 дано краткое описание технологий «мгновенной конденсации», MCVD, OVD, VAD и проведено сравнение оптических характеристик ФСС, получаемых при помощи указанных технологий. В параграфе 1.2 приводятся и обсуждаются основные результаты исследований явления фоточувствительности в германосиликатных световодах. В параграфе 1.3 показано, что в отличие от германосиликатного стекла, собственные и фотоиндуцированные дефекты в фосфоросиликатном стекле изучены достаточно слабо и к моменту начала работы над диссертацией природа фотоиндуцированного наведения ПП в ФСС не была установлена.

Вторая глава посвящена описанию методик измерения наведенного ПП и оптических потерь в световодах, а также принципов работы экспериментальных установок, использованных в настоящей работе. В параграфе 2.1 приведены основные характеристики ФСС, использованных при исследовании эффекта фотоиндуцированного наведения ПП. При выполнении большей части исследований были использованы одномодовые световоды с содержанием оксида фосфора в сердцевине 11–15 мол. %, вытянутые при температуре 1940 °С. В этих световодах разность ПП сердцевины и оболочки составляла $\Delta n = 0,01 - 0,013$, длина волны отсечки $\lambda_c = 1050 - 1100$ нм, а уровень оптических потерь в диапазоне длин волн 1100–1600 нм не превышал 2–3 дБ/км. В параграфе 2.2 описаны различные процедуры подготовки световодов к УФ-облучению (насыщение водородом, предэкспонирование), режимы облучения световодов и методики измерения наведенного ПП в световодах. Подготовка

световода к облучению по методике предэкспонирования реализуется следующим образом на первом этапе насыщенный водородом световод подвергается облучению гомогенным пучком лазера с небольшой дозой, затем световод выдерживается некоторое время (~3 недели) при комнатной температуре для выхода из него молекулярного водорода. После этой процедуры в месте гомогенного облучения (предэкспонирования) световода может быть произведено повторное УФ-облучение – например, с целью записи брэгговской решетки. В параграфе 2.3 обсуждаются методы исследования микроскопических дефектов (анализ спектров поглощения, спектров электронного парамагнитного резонанса и спектров комбинационного рассеяния), наводимых в сетке фосфоросиликатного стекла при воздействии УФ-излучения.

В третьей главе приведены результаты спектрального анализа фотоиндуцированных дефектов в сетке фосфоросиликатного стекла. Показана связь между изменением интенсивности полос оптического поглощения и возникновением точечных дефектов (центров окраски). Самое значительное по величине наведенное поглощение было зарегистрировано на длинах волн короче 200 нм. Как видно из Рис. 1, наибольшей интенсивности это поглощение достигает в полосе с максимумом 6.9 эВ (180 нм), которая наблюдается и в спектре пропускания необлученного образца. Установлена связь данной полосы с поглощением фосфорного кислородо-дефицитного центра (ФКДЦ), которая была подтверждена квантово-химическими расчетами.

Предложена модель ФКДЦ в виде трехкоординированного атома фосфора связанного с двухкоординированным атомом кремния в кварцевом стекле (Рис. 2). Рассчитанная величина наведенного ПП на длине волны ~1500 нм с учетом интенсивности всех наведенных полос поглощения в УФ и видимом спектральных диапазонах дает значение $\sim 10^{-4}$ для насыщенных водородом образцов заготовки ФСС, что по порядку величины соответствует измерениям наведенного ПП. Расчет показывает, что вклад полосы поглощения ФКДЦ в наведение ПП составляет более 90%.

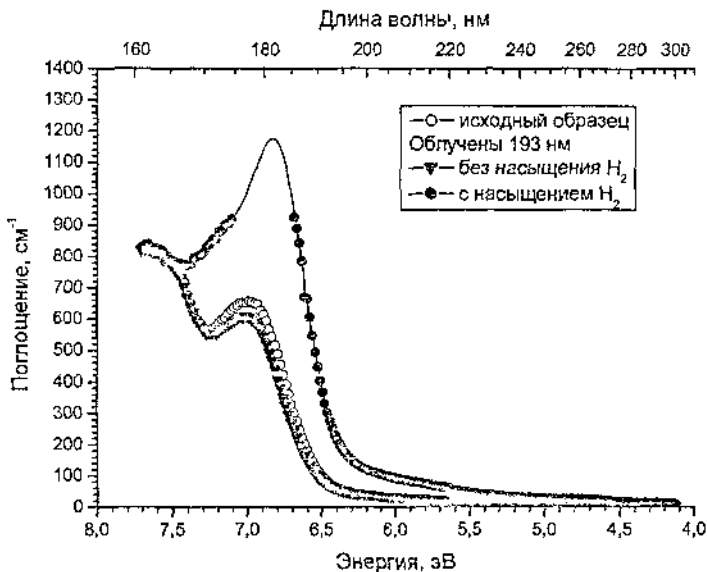


Рис 1 Спектры пропускания образцов сердцевины заготовки из фосфоросиликатного стекла в УФ-диапазоне до и после облучения ArF-лазером дозой в 1 кДж/см^2

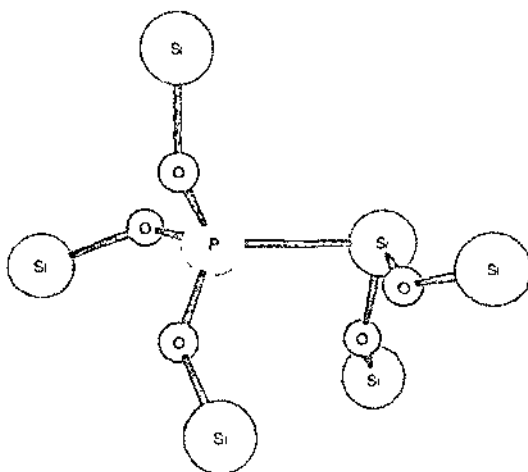


Рис 2 Модель ФКДЦ трехкоординированный атом фосфора, связанный с двухкоординированным атомом кремния в кварцевом стекле

В четвертой главе представлен подробный анализ формы дозой зависимости наведенного ПП. Рассмотрен достаточно простой и в то же время информативный метод анализа дозой зависимости, основанный на исследовании поведения ее производной. На основе полученных результатов сделано предположение, что в ФСС имеет место двухэтапный процесс наведения ПП.

Для математического выражения изменений в концентрации дефектов в сердцевине световода под действием УФ-излучения были предложены уравнения, используемые для описания кинетики химических процессов². Изменения концентраций «исходных» A , «промежуточных» B и «конечных» C дефектов в двухэтапном процессе экспонирования световодов ($A \xrightarrow{\nu_1} B \xrightarrow{\nu_2} C$), насыщенных водородом, могут быть представлены в дифференциальной форме в следующем виде:

$$\begin{aligned} A &= -\nu_1 A, \\ B &= \nu_1 A - \nu_2 B, \\ C &= \nu_2 B, \end{aligned} \quad (1)$$

где ν_1 и ν_2 – скоростные коэффициенты фотохимических реакции $A \xrightarrow{\nu_1} B$ и $B \xrightarrow{\nu_2} C$, отражающих соответственно 1-й и 2-й этапы преобразования дефектов. Решения этих дифференциальных уравнений имеют вид:

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\nu_1 t}, \\ B &= \nu_1 A_0 \left(\frac{e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t}}{\nu_2 - \nu_1} \right), \\ C &= A_0 \left[1 + \left(\frac{\nu_1 e^{-\nu_2 t} - \nu_2 e^{-\nu_1 t}}{\nu_2 - \nu_1} \right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где A_0 – начальная концентрация «исходных» дефектов, t – время или доза экспонирования. Анализ математических выражений (2) показывает, что при любом соотношении скоростных коэффициентов ν_1 и ν_2 на этапах 1 и 2 существует максимум функции $B(D)$ (D – доза экспонирования). Он возникает

² J. Canning, "Photosensitization and photostabilization of laser-induced index changes in optical fibers", Optical Fiber Technology, Vol. 6, p. 275-279 (2000)

из-за того, что прирост в концентрации «промежуточных» дефектов при уменьшении концентрации «исходных» дефектов становится при некоторой дозе D таким малым, что сравнивается с их потреблением во втором процессе (формула (1) для производной от B) Из существования максимума функции B следует, что для функции $C(D)$ при таком же значении D должен существовать «перегиб», или иначе - S-образная форма Другими словами, дозная зависимость наведенного ПП имеет 3 участка начальный с ограниченным ростом функции, промежуточный с увеличенным ростом функции и замыкающий, имеющий более медленный, чем на промежуточном, рост функции наведенного ПП

Таким образом, в работе был предложен достаточно простой в реализации и информативный метод исследования преобразования дефектов в сердцевине ФСС под действием УФ-излучения, заключающийся в анализе формы кривой дозной зависимости наведенного ПП (Рис 3) и производной от нее (Рис 4) Показано, что S-образная форма дозной зависимости наведения ПП может быть признаком двухэтапного процесса преобразования дефектов в сетке стекла, а производная дозной зависимости наведенного ПП отображает динамику изменения концентрации дефектов «промежуточного» типа

Кроме того, анализ дозных зависимостей наведенного ПП, полученных для образцов одного и того же ФСС, но подготовленных к экспонированию в различных условиях, позволяют сделать предположение о существовании, по крайней мере, двух независимых каналов преобразования исходных дефектов в сердцевине одноэтапное преобразование без участия водорода и двухэтапное преобразование, для которого фотохимические реакции с водородом необходимы При этом основным процессом, приводящим к наведению ПП в фосфоросиликатных световодах до значений $\sim 10^3$, является двухэтапный процесс с участием водорода на первом этапе

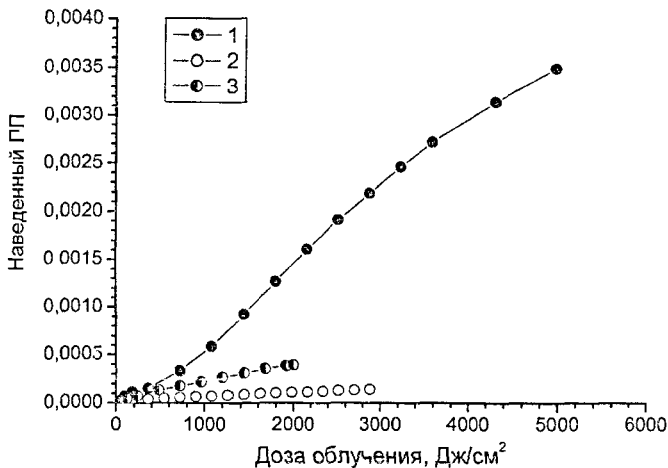


Рис 3 Дозные зависимости наведенного ПП, полученные при облучении ArF-лазером насыщенного водородом (кривая 1), исходного (кривая 2) и предэкспонированного дозой 1 2 кДж/см² (кривая 3) образцов ФСС

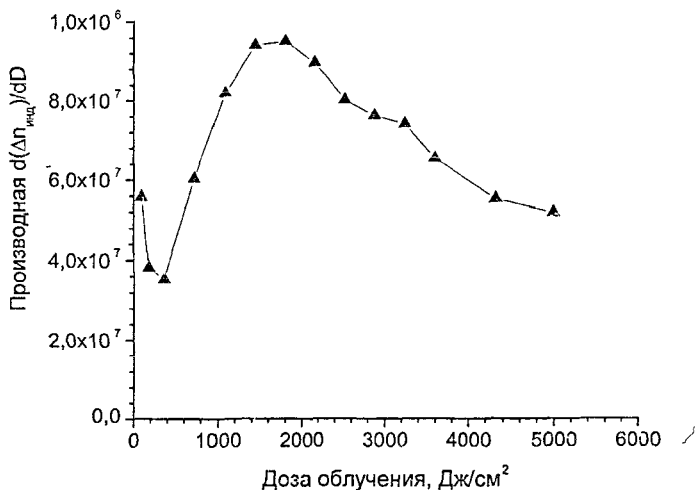


Рис 4 Производная от дозной зависимости наведенного ПП (кривая 1 на Рис 3), взятая по дозе облучения

Пятая глава посвящена сопоставлению кривых дозых зависимостей наведенного ПП, полученных при облучении образцов ФСС на различных длинах волн УФ-диапазона. Проведено исследование динамики наведения ПП в ФСС под действием эксимерных лазеров, генерирующих на длинах волн 248, 193 и 157 нм.

Выявлены основные физические факторы, которые могут объяснить низкую фоточувствительность ФСС на длине волны генерации KrF-лазера - 248 нм. Показано, что предварительное экспонирование (предэкспонирование) ФСС эксимерными лазерами на длинах волн 193 и 157 нм не приводит к заметному увеличению фоточувствительности на длине волны 248 нм.

Впервые экспериментально продемонстрирована фоточувствительность ФСС под действием излучения F₂-лазера (157 нм) (Рис 5).

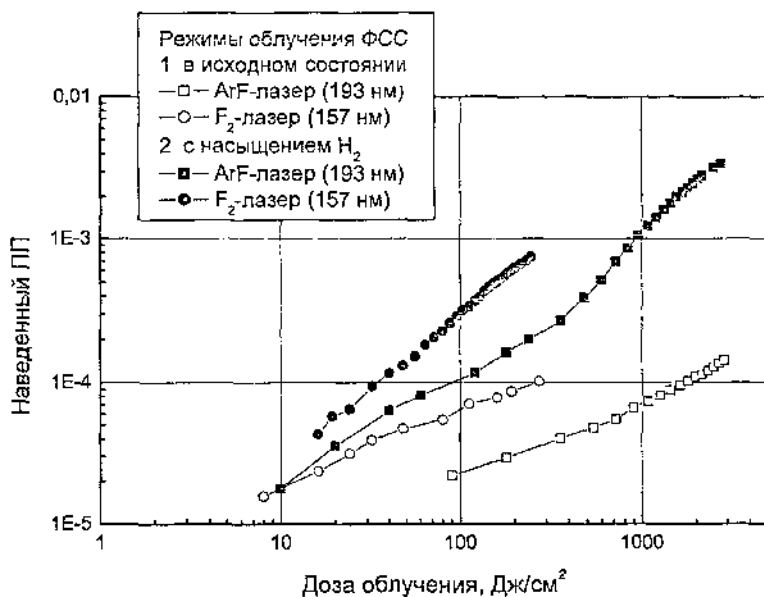


Рис 5 Дозные зависимости наведенного ПП, полученные при УФ-облучении фосфоросиликатных световодов

Предложено объяснение более высокой фоточувствительности на этой длине волны по сравнению с режимами облучения ArF (193 нм) и KrF (248 нм) лазерами. Поскольку кванты излучения с длиной волны 157 нм имеют бо́льшую энергию (7,9 эВ), чем кванты излучения с длинами волн 193 и 248 нм (6,4 и 5 эВ), то вероятность инициирования фотохимических реакций в сетке фосфоросиликатного стекла для излучения 157 нм будет выше. Режим облучения на 157 нм оказался самым эффективным с точки зрения наведения ПП. Однако отсутствие в настоящее время промышленного производства фазовых масок, предназначенных для работы на длине волны 157 нм, препятствует применению F₂-лазера для записи брэгговских решеток в ФСС. Поэтому и создаваемую лабораторную технологию записи брэгговских решеток в ФСС мы ориентировали на применение ArF-лазера.

Проведенные исследования показали, что для записи брэгговских решеток в ФСС наиболее подходящим в настоящее время является излучение эксимерного ArF-лазера с длиной волны 193 нм и предварительное насыщение световода молекулярным водородом или дейтерием. Высокие значения наведенного ПП ($> 10^3$), достигнутые при такой мощности облучения, позволяют нам утверждать, что проблема записи решеток в ФСС для их использования в качестве зеркал-отражателей в волоконных лазерах и усилителях была нами решена.

Описаны режимы записи брэгговских решеток для ВКР-лазера на основе ФСС и характеристики изготовленного лазера. При создании этого лазера был использован световод с рекордно высоким коэффициентом рамановского усиления (10,29 дБ/(км·Вт)). Этот световод перед облучением был подвергнут насыщению дейтерием (а не водородом) с целью минимизации наведенных потерь на поглощение. Запись решеток осуществлялась при помощи ArF-лазера в режиме облучения, обеспечивающего оптимальную динамику наведения ПП в ФСС (плотность энергии в импульсе – 100 мДж/см², длительность импульса – 8 нс, частота повторения импульсов – 10 Гц). В результате созданный ВКР-лазер показал рекордные значения эффективности преобразования накачки (45%) и дифференциальной квантовой эффективности (83 %) благодаря отсутствию оптических потерь на стыковку решеток с ФСС.

В заключении диссертации сформулированы ее основные результаты

1 Исследована фоточувствительность фосфоросиликатных световодов (ФСС) с низкими оптическими потерями к воздействию излучения эксимерных лазеров, генерирующих на длинах волн 248 (KrF-лазер), 193 (ArF-лазер) и 157 (F₂-лазер) нм. Показано, что при облучении ФСС F₂-лазером величина наведенного показателя преломления (ПП) оказывается в 2-3 раза больше, чем при облучении ArF-лазером в таких же условиях эксперимента.

2 Обнаружено стабильное увеличение ПП при комнатной температуре ($\sim 1.5 \cdot 10^{-4}$ при дозе облучения 2.9 кДж/см²), индуцированное излучением ArF-лазера, в ФСС без их предварительного насыщения молекулярным водородом. Установлено, что предварительное насыщение ФСС водородом приводит к увеличению на порядок скорости наведения ПП при облучении на длинах волн 193 нм (ArF-лазер) и 157 нм (F₂-лазер).

3 В спектре наведенного поглощения фосфоросиликатного стекла, предварительно насыщенного водородом и облученного затем ArF-лазером, обнаружена и изучена интенсивная полоса с максимумом при энергии 6.9 эВ (180 нм). Для объяснения этой полосы предложена модель фосфорного кислородо-дефицитного центра (подтвержденная квантово-химическими расчетами) в виде трехкоординированного атома фосфора, связанного с двухкоординированным атомом кремния в кварцевом стекле. Расчет показал, что вклад обнаруженной полосы поглощения в наведение ПП на длинах волн 1300–1600 нм составляет более 90%.

4 Проведен анализ дозных зависимостей ПП и поглощения, наведенных лазерным УФ-излучением. На основе данного анализа, с помощью феноменологической модели, описывающей фотоиндуцированные процессы в ФСС, насыщенных молекулярным водородом, и включающей в себя два независимых процесса преобразования сетки стекла, показано, что один процесс представляет собой одноэтапное преобразование дефектов без участия водорода, а другой — двухэтапное преобразование, для которого необходимы фотохимические реакции молекулярного водорода с элементами сетки стекла.

5 Создана лабораторная технология записи высококонтрастных (модуляция наведенного ПП $\sim 10^{-3}$) брэгговских решеток ПП в световодах с малыми оптическими потерями на основе фосфоросиликатного стекла. С ее помощью записаны решетки-зеркала в двухкаскадном волоконном ВКР-лазере, использующем ФСС в качестве нелинейной среды. В этом лазере достигнуты рекордно высокие значения эффективности преобразования накачки (до 45%) и дифференциальной квантовой эффективности (до 83%), благодаря отсутствию оптических потерь на стыковку решеток с ФСС.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1 S L Semjonov, A A Rybaltovsky, Y V Laronov, M M Bubnov, E M Dianov, "Influence of hydrogen loading and UV irradiation on optical properties of phosphorus-doped fibers", Proc Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides (BGPP'99), Florida, USA TOPS Vol 33, p 267-271 (1999)
- 2 E M Dianov, M M Bubnov, A N Gurianov, V F Hopin, E B Kryukov., V G Plotnichenko, A A Rybaltovskii, V O Sokolov, "Phosphosilicate glass optical fibers a promising material for Raman lasers", Proc European Conference of Optical Communications (ECOC'2000), Munich, Germany, Vol 3 (2000)
- 3 A A Rybaltovsky, Y V Laronov, S L Semjonov, V G Plotnichenko, E B Krukova, Y N Pyrkov, M M Bubnov, E M Dianov, "Relation between UV-induced refractive index and absorption in phosphosilicate optical fibers", Proc Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides (BGPP'2001), Stresa, Italy, Technical Digest, BthA3-1 (2001)
- 4 Ю В Ларионов, А А Рыбалтовский, С Л Семенов, М М Бубнов, Е М Дианов, «Особенности проявления фоточувствительности в

- фосфоросиликатных световодах с малыми потерями», Квантовая электроника, Т 32, № 2, с 124-128 (2002)
- 5 Y Larianov, A Rybaltofsky, S Semjonov, M Bubnov, E Dianov, S Vartapetov, M Kurzanov, A Obidin, V Yamschikov, "Photosensitivity and photosensitization of highly phosphorus-doped fibers under 157-nm F2 excimer laser irradiation", Proc Optical Fiber Communication (OFC' 2003), Atlanta, Georgia, USA, Technical Digest, v 1, p 38-39 (2003)
 - 6 I A Bufetov, M M Bubnov, Y V Larianov, O I Medvedkov, S A Vasihev, M A Melkounov, A A Rybaltofsky, S L Semjonov, E M Dianov, A N Gur'yanov, V F Khorin, F Durr, H G Limberger, R-P Salafhe, M Zeller, «Highly efficient one- and two-cascade Raman lasers based on phosphosilicate fibers», Laser Physics, Vol 13, № 2, p 234–239 (2003)
 - 7 Ю В Ларионов, А А Рыбалтовский, С Л Семенов, М А Курзанов, А З Обидин, С К Вартапетов, «Исследование динамики преобразования точечных дефектов по наведенному показателю преломления», Квантовая электроника, Т 33, № 10, с 919-925 (2003)
 - 8 Ю В Ларионов, А А Рыбалтовский, С Л Семенов, С К Вартапетов, М А Курзанов, А З Обидин, «Фоточувствительность световодов, легированных различными примесями», Квантовая электроника, Т 34, № 2, с 175-179 (2004)
 - 9 А А Рыбалтовский, В О Соколов, В Г Плотниченко, А В Ланин, С Л Семенов, А Н Гурьянов, В Ф Хопин, Е М Дианов, «Фотоиндуцированное поглощение и наведение показателя преломления в фосфоросиликатных световодах под действием излучения 193 нм», Квантовая электроника, Т 37, № 4, с 388-393 (2007)